

На правах рукописи

ПЕТРОВА ИННА РОМАНОВНА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО МЕТОДА НАКЛОННОГО
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ
ВОЗМУЩЕНИЙ**

Специальность 01.04.03 - «Радиофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Казань - 2011

Работа выполнена на кафедре радиофизики Института физики
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
зав. кафедрой радиофизики
Казанского федерального университета,
Шерстюков Олег Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Казанского государственного энергетического университета
Смоляков Борис Петрович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
радиоэлектроники Казанского федерального университета
Насыров Игорь Альбертович

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн Российской академии наук

Защита диссертации состоится «23» июня 2011 г. в 14 часов 30 минут
в ауд. 210 Института физики на заседании диссертационного совета
Д 212.081.18 в ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный
университет. По адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
(Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан « » мая 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18,
д.ф.-м.н., профессор

Карпов А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Экспериментальное и теоретическое исследование возмущений в ионосфере Земли, порождаемых различными источниками естественного и искусственного происхождения, является одной из наиболее важных и интересных задач физики околоземного космического пространства и имеет большое научное и практическое значение.

Практическая важность таких исследований определяется тем, что возмущения в ионосфере существенным образом влияют на распространение электромагнитных волн в широком диапазоне частот. В коротковолновом диапазоне такое влияние приводит к доплеровскому сдвигу частоты (далее – ДСЧ), вариациям амплитуды, фазы и углов прихода сигнала. Для успешного решения задач радиосвязи в диапазоне коротких радиоволн необходимы расчеты характеристик распространения радиосигналов через ионосферу с учетом влияния нестационарных процессов. В настоящее время все более возрастают требования к точности определения координат, скорости и ориентации объекта с помощью спутниковых навигационных систем. В связи с тем, что ионосфера оказывает весьма существенное влияние на погрешность измерения псевдодальностей по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS, задача исследования ионосферных возмущений приобретает новую актуальность.

Нестационарные процессы в ионосфере представляют интерес как проявления волн разных пространственно-временных масштабов, распространяющихся из нижележащей атмосферы. Потоки энергии и импульса, переносимые из нижних областей атмосферы в верхние, сравнимы с теми, которые поступают от солнечного излучения или других источников. Поэтому волновые процессы в верхней атмосфере, частью которой является ионосфера, являются важным фактором в системе общей атмосферной циркуляции. Решение вопросов, связанных с динамикой верхней атмосферы, невозможно без учета этих процессов. Несмотря на значительные усилия и достижения в области исследования нестационарных процессов в ионосфере, многие важные вопросы остаются еще открытыми. В связи со сложностью и многообразием связей в системе «Солнце–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля», наличием различных физических механизмов, ответственных за генерацию волновых возмущений, актуальным представляется проведение комплексных систематических исследований волновых возмущений.

Для исследования процессов в ионосфере используются различные методы и техника, в том числе ионозонды вертикального зондирования, радары некогерентного рассеяния, трансionoсферное зондирование с помощью сигналов навигационных спутников GPS. В комплексных ионосферных исследованиях широкое применение получил метод доплеровского радиозондирования. Преимуществами этого метода являются высокая чувствительность к малым изменениям частоты и, как следствие, высокое временное разрешение, сравнительная простота и дешевизна аппаратных решений, возможность организации непрерывных наблюдений.

Временные масштабы волновых процессов в ионосфере очень широки: от нескольких минут до нескольких дней и даже месяцев. Для исследования возмущений всех временных масштабов необходимы ряды данных, отвечающие определенным требованиям. Во-первых, временной ряд должен быть достаточно длинным для исследования вариаций с периодами планетарных волн. Во-вторых, необходимо

высокое временное разрешение для вычисления спектра вариаций с периодами внутренних гравитационных волн. Именно результаты, полученные доплеровским методом, отвечают этим требованиям, т.к. метод имеет наилучшую чувствительность для быстрых вариаций сигнала, отраженного от ионосферы и позволяет проводить непрерывные измерения для получения длинных рядов экспериментальных данных.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование морфологии и спектрального состава ионосферных возмущений с периодами от 1 минуты до 60 суток в среднеширотной ионосфере на основе данных, полученных методом наклонного доплеровского радиозондирования.

Решаемые задачи

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Изучить влияние изменений электронной концентрации на результаты доплеровского радиозондирования.
2. Выявить влияние суточно-сезонных особенностей ионосферных возмущений на ДСЧ КВ-сигнала.
3. Исследовать особенности спектрального состава ионосферных возмущений различных временных масштабов для разных сезонов.
4. Проанализировать особенности ионосферных возмущений во время геомагнитных бурь по изменениям вариаций ДСЧ.

Научная новизна

1. Установлено, что наибольшее влияние на формирование ДСЧ оказывают изменения электронной концентрации в узком интервале 20 – 40 км вблизи точки отражения радиосигнала. Максимальный вклад дает изменение электронного содержания по времени. Наблюдается влияние горизонтальных градиентов. При этом вклад поперечной составляющей (поперек трассы) в формирование ДСЧ больше, чем продольной (вдоль трассы).
2. Выявлены особенности влияния ионосферных возмущений на интенсивность вариаций ДСЧ для разных сезонов.
3. Впервые по данным доплеровского радиозондирования ионосферы выявлены вариации ДСЧ, являющиеся эффектами возмущений с периодами от 2 до 15 суток (2, 4, 5, 7, 8, 15 суток).
4. Впервые по данным доплеровского радиозондирования ионосферы обнаружены изменения спектрального состава вариаций ДСЧ с периодами среднемасштабных ПИВ (от 16 до 32 минут) во время геомагнитных бурь, свидетельствующие о наличии дополнительного источника возмущений в этом диапазоне периодов.

Положения, выносимые на защиту

1. Статистическая модель влияния изменения электронной концентрации в ионосфере на ДСЧ КВ-сигнала.
2. Закономерности влияния на ДСЧ возмущений электронной концентрации в восходно-заходный период и во время солнечного затмения, особенности, характерные для разных сезонов.

3. Установленные особенности спектрального состава ионосферных возмущений с периодами от 5 до 120 минут, от 1 до 72 часов, от 2 до 60 дней для разных сезонов.
4. Обнаруженные особенности ионосферных возмущений во время геомагнитных бурь, вызывающие наблюдаемые изменения вариаций ДСЧ.

Достоверность полученных результатов обусловлена большим объемом проведенных измерений за период с 2003 г. по 2010 г., использованием стандартных методов обработки средствами математической статистики, совпадением полученных результатов с модельными представлениями и выводами других авторов.

Научная и практическая значимость

Полученные для разных условий и радиотрасс характерные значения доплеровских искажений коротковолновых сигналов могут быть использованы при решении задач радиосвязи, навигации и пеленгации в соответствующем диапазоне, при расчете и прогнозировании характеристик распространения КВ сигналов через ионосферу, которая выступает как основная каналобразующая среда.

Обнаруженные сезонные особенности суточных вариаций параметров КВ-сигнала, являющиеся проявлениями внутренних гравитационных волн, распространяющихся на ионосферных высотах, имеют большое значение при анализе сезонных закономерностей динамического режима среднеширотной ионосферы.

Выявленные особенности изменения интенсивности и спектрального состава волновых процессов во время геомагнитных бурь и обнаруженные зависимости между анализируемыми параметрами и показателями геомагнитной активности представляются важными для понимания процессов, происходящих в системе «Солнце – магнитосфера – ионосфера».

Обнаруженные особенности спектрального состава волновых процессов различных временных масштабов представляют особый интерес для развития моделей преобразования энергии в атмосфере Земли.

Личный вклад автора

Автор принимала непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, на основе которых выполнена настоящая работа. Роль диссертанта в них заключалась в постановке задач эксперимента, в составлении программы и расписания эксперимента, для проведения циклов измерений. Автором были разработаны пользовательский интерфейс управляющей программы, модули, обеспечивающие выполнение измерений в автоматическом режиме по заранее заданному сценарию и хранение результатов.

Диссертантом лично было разработано программное обеспечение для автоматизации обработки результатов эксперимента и подсистема хранения данных, а также проведена полная обработка данных циклов измерений 2003, 2005 – 2006, 2009 - 2010 г.г., проанализированы полученные результаты, предложена их интерпретация и сделаны выводы.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались и представлены на следующих российских и международных конференциях: XX, XXI, XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн (Н. Новгород, 2002 г. Йошкар-Ола, 2005 г., Лео, 2008 г.), XII школе-конференции по дифракции и распространению радиоволн

(Москва, 2001 г.), LVII Научной сессии, посвященной Дню Радио (Москва, 2002 г.), Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши океана и атмосферы» (Москва, 2002 г.), VI, VII, IX Байкальских международных школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2003 г.; Иркутск, 2004 г.; Иркутск, 2006 г.), XXXV и XXXVI Ассамблеях COSPAR (Париж, 2004 г.; Китай, 2006 г.), III, IV, V международных конференциях «Излучение и рассеяние ЭМВ» (Таганрог, 2003 г.; Таганрог, 2005 г.; Таганрог, 2007 г.), V международной конференции «Проблемы геокосмоса» (Санкт-Петербург, 2004 г.), IX Всероссийской конференции «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» (Москва, 2004 г.); XIV Международной Крымской конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2004 г.), XI и XIII Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана» (Томск, 2004 г.; Томск, 2006 г.), IRI/COST 296 WORKSHOP «Ionosphere - Modelling, Forcing and Telecommunications» (Прага, 2007г.), 17th International Beacon Satellite Symposium (Барселона, 2010).

Исследования по теме диссертации были поддержаны грантами РФФИ: 01-05-65251-а «Волновые процессы и турбулентность в термосфере» (исполнитель), 03-07-90288-в «Геофизическая информационная система Казанского университета», 05-05-64651-а «Волновые процессы различных масштабов в нижней термосфере».

Результаты использовались при выполнении госбюджетных тем кафедр радиофизики Казанского университета; тема "Радиофизические основы информационных систем" N гос. рег. 01200203344, 2001-2005гг. (исполнитель).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем - 151 страница, 66 рисунков, 7 таблиц, список цитируемой литературы из 139 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, научная и практическая значимость результатов, приведено краткое содержание работы.

В первой главе представлен обзор литературы по исследованиям ионосферы с помощью доплеровского метода радиозондирования. Рассмотрены работы, в которых показана связь ДСЧ зондирующего сигнала с изменениями параметров ионосферы и обосновывается возможность получения информации о процессах в ионосфере по изменениям ДСЧ. Далее представлен обзор основных результатов ионосферных исследований, полученных доплеровским методом. Результаты доплеровского радиозондирования активно использовались для исследования особенностей распространения коротковолновых сигналов. Второе направление доплеровских экспериментов - это исследование ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения. Результаты представлены в большом количестве работ, например [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

В Казанском университете была создана автоматизированная система зондирования ионосферы доплеровским методом, позволяющая проводить измерения в режиме длительного непрерывного мониторинга [8]. Как следует из проведенного анализа публикаций, доплеровский метод использовался в относительно коротких экспериментальных циклах, что позволяет исследовать ионосферные возмущения с

периодами до нескольких часов. Основная концепция измерительного комплекса Казанского университета – организация длительных непрерывных измерений в режиме мониторинга. Для реализации такого подхода к организации измерений была создана автоматизированная система управления экспериментом [8], что позволило получить длительные ряды непрерывных доплеровских измерений и проанализировать особенности ионосферных возмущений в широком диапазоне периодов (от 1 минуты до 60 суток).

Во второй главе представлена методика обработки данных, полученных с помощью доплеровского метода радиозондирования, исследовано влияние изменения электронной концентрации на полученные значения ДСЧ.

В разделе 2.1 приводится характеристика экспериментальных данных. Были использованы данные, полученные на доплеровском измерительном комплексе Казанского университета в течение экспериментальных циклов: август – декабрь 2003г., август 2005г. – май 2006г., март 2009г. – декабрь 2010г. Измерения проводились на частотах 4996 кГц и 9996 кГц – станция точного времени РВМ и 6160 кГц – радиовещательная станция «Радио России», г. Архангельск.

В разделе 2.2 описаны методы, использованные при обработке данных.

Методика обработки основана на спектральном оценивании с помощью оконного преобразования Фурье. Для временного интервала, определяемого шириной спектрального окна, вычислялись значения ДСЧ, окно сдвигалось, и параметры определялись для другого временного интервала.

Наличие оптимального значения ширины спектрального окна обусловлено двумя противоположными тенденциями. С одной стороны, при увеличении ширины окна улучшается спектральное разрешение и, увеличивая ширину временного окна, можно разрешить более близкие спектральные составляющие. С другой стороны, наблюдаемые в ионосферном эксперименте сигналы, как правило, существенно нестационарны, и изменение параметров спектрального состава сигнала за время спектрального оценивания приводит к уширению спектральной линии. Для определения оптимального значения ширины спектрального окна был проведен предварительный анализ обрабатываемых данных. Ширина спектрального окна выбиралась как длина выборки, при которой ширина спектральной линии минимальна. Среднее значение ширины спектрального окна составило 40 с. Для выбора оптимального значения сдвига спектрального окна определялся интервал корреляции оценок ДСЧ, который обусловлен перекрытием временных окон при проведении спектрального анализа. Оптимальный сдвиг спектрального окна выбирался не превышающим интервала корреляции и составил 5 с.

Точность определения ДСЧ ионосферного сигнала зависит от точности исходных данных, полученных в ходе эксперимента, и точности обработки этих данных. При создании измерительного комплекса были использованы аппаратные решения, обеспечивающие высокую стабильность параметров приемного тракта [8]. Для определения точности обработки полученных экспериментальных данных при использовании разработанной методики сделаны оценки значения стандартного отклонения среднего ДСЧ, которое составило $5.8 \cdot 10^{-4}$ Гц. С учетом стабильности частоты приемной и передающей аппаратуры это позволяет исследовать флуктуации доплеровских искажений сигнала с точностью до 10^{-3} Гц.

В разделе 2.3 представлены результаты моделирования ДСЧ на основе профиля электронной концентрации, полученного из модели IRI. Такое моделирование позволило оценить высотный интервал, изменение электронной концентрации в

котором дает наибольший вклад в ДСЧ. Установлено, что наибольшее влияние на формирование ДСЧ оказывают изменения электронной концентрации в узкой области 20 – 40 км вблизи области отражения. Для используемых в эксперименте частот высотный диапазон составил от 120 км до 170 км. Сопоставление результатов модельных расчетов с экспериментальными данными показало, что экспериментальные значения суточного размаха вариаций ДСЧ по порядку величины соответствует модельным расчетам в предположении, что распространение идет через область F.

Раздел 2.4. Для того чтобы оценить влияние горизонтального градиента электронной концентрации на ДСЧ была построена авторегрессионная модель с использованием данных полного электронного содержания (далее ПЭС).

$$\hat{f}_D = a_1 I + a_2 \frac{\partial I}{\partial t} + a_3 \frac{\partial I}{\partial \varphi} + a_4 \frac{\partial I}{\partial \theta} + a_5,$$

где $\frac{\partial I}{\partial t}$ - изменение ПЭС со временем;

$\frac{\partial I}{\partial \varphi}$ - изменение ПЭС по широте;

$\frac{\partial I}{\partial \theta}$ - изменение ПЭС по долготе;

I - значение ПЭС.

Для вычисления коэффициентов модели использован адаптивный алгоритм, который содержит параметр, определяющий скорость адаптации модели. Если этот параметр мал, то модель медленно адаптируется, если большой, то становится излишне чувствительной к случайным изменениям исходных данных. Возникает необходимость определения оптимального значения такого параметра. Для этого было проанализировано поведение ошибки предсказания для рассматриваемой модели. Значение, соответствующее минимуму ошибки составило 0.063, что соответствует характерному времени изменения параметров модели ≈ 30 часов. Относительная ошибка предсказания ДСЧ составляет 0.43, коэффициент детерминации равен 0.8.

В рассматриваемой модели использованы четыре параметра, по-разному влияющие на ДСЧ. Были сделаны оценки относительного вклада каждого параметра в прогнозируемое значение ДСЧ для двух трасс. Трасса Москва – Казань ориентирована по широте (зональная ориентация), и трасса Архангельск – Казань имеет ориентацию близкую к меридиональной. Наибольший вклад в прогнозируемое значение ДСЧ в обоих случаях дает изменение ПЭС по времени. Из пространственных производных для зональной трассы больший вклад дает $\frac{\partial I}{\partial \varphi}$, а для

меридиональной - $\frac{\partial I}{\partial \theta}$, т.е. в обоих случаях поперечный градиент ПЭС оказывает на ДСЧ большее влияние, чем продольный.

В **третьей главе** приведены результаты анализа влияния суточно-сезонных особенностей ионосферных возмущений на ДСЧ.

В разделе 3.1 представлены результаты, полученные для дней с низким уровнем геомагнитной активности. Показано, что максимальные значения ДСЧ наблюдаются в восходно–заходный период и достигают значения 1-2 Гц. Значения вертикальной составляющей скорости перемещения области отражения, соответствующие таким

значениям ДСЧ, составляют 20–60 м/с. В дневное время значения ДСЧ составили десятые доли Гц, значения вертикальной составляющей скорости - десятые доли м/с.

В разделе 3.2 проанализированы особенности ионосферных возмущений во время солнечного затмения, когда возмущения электронной концентрации похожи на процессы во время восхода-захода, но происходят за более короткий период времени. По наблюдениям солнечного затмения 29 марта 2006г. обнаружены значительные изменения ДСЧ до 3-4 Гц за короткий промежуток времени, около полутора часов, вертикальная составляющая скорости перемещения точки отражения в этот период достигала 200 м/с.

В разделе 3.3 проанализированы среднесезонные зависимости ДСЧ принимаемого сигнала от времени суток. Значения статистических величин, характеризующих интенсивность вариаций ДСЧ (стандартное отклонение, размах и интерквартильный размах), в осеннее - зимний период выше, чем в весеннее - летний. Значения интерквартильного размаха в летний и зимний период различаются в 3-4 раза (рис.1). Такие различия являются проявлением сезонных особенностей ионосферных возмущений.

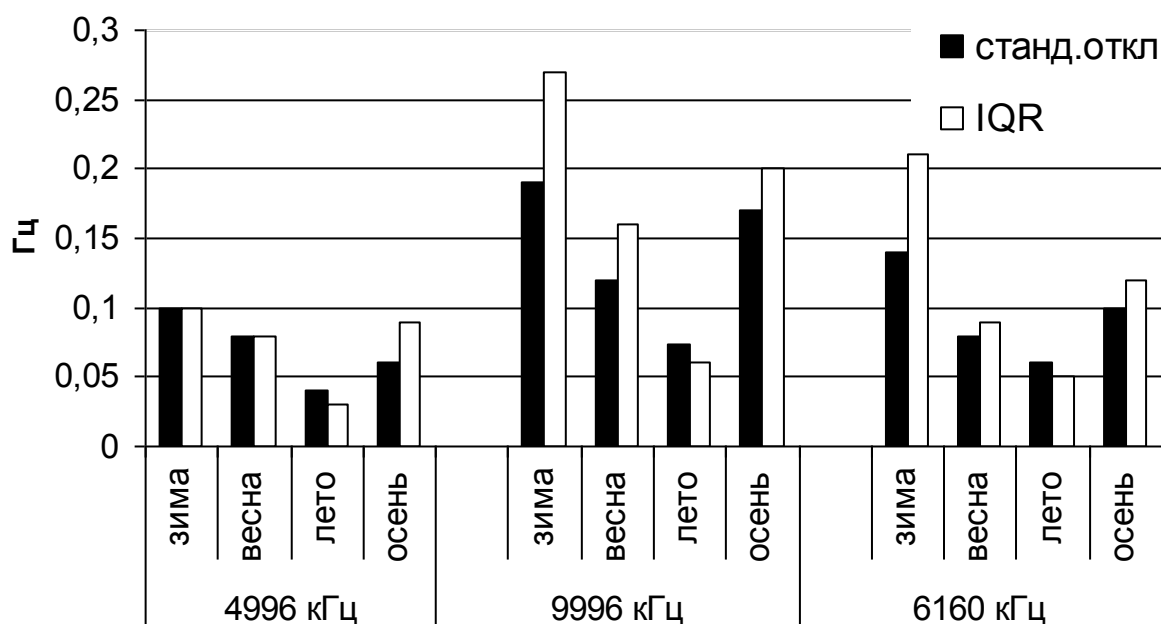


Рис. 1. Стандартное отклонение и интерквартильный размах суточных вариаций ДСЧ, усредненных по сезонам.

В **четвертой главе** представлены результаты спектрального анализа вариаций ДСЧ, являющиеся проявлением волновых возмущений различных масштабов в ионосфере.

В разделе 4.1 описаны особенности спектрального анализа рядов ДСЧ с помощью дискретного вейвлет-преобразования и метода MUSIC.

В разделе 4.2 представлены результаты спектрального анализа вариаций с периодами от 5 минут до 60 суток. Спектральный анализ проводился для трех диапазонов периодов: от 5 до 120 минут, от 1 до 72 часов и от 2 до 60 суток. Такое разделение на диапазоны выбрано в соответствии с различием физических механизмов, ответственных за формирование вариаций ДСЧ разных временных масштабов. Спектра, полученного на основе временного ряда измерений сигнала на

частоте 6160 кГц представлен на рис.2. Спектр состоит из трех сегментов, каждый из которых соответствует различным масштабам периодов вариаций. Полученные фрагменты спектра дополняют друг друга, но при этом каждый имеет свои особенности, которые проанализированы в следующих разделах.

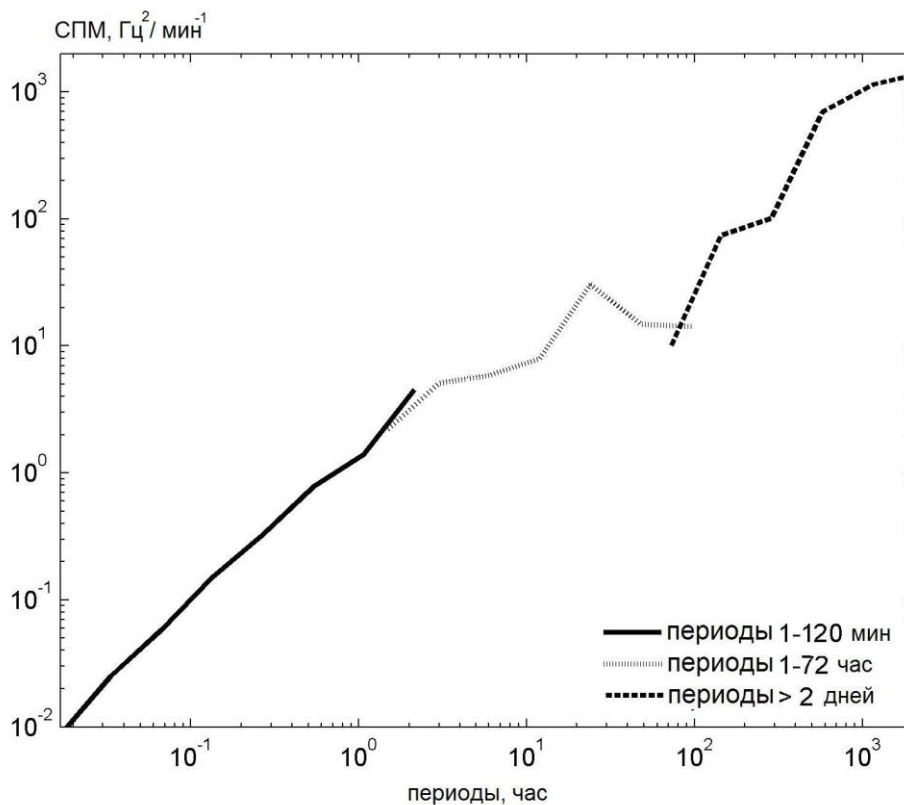


Рис.2. Спектр вариаций ДСЧ сигнала радиовещательной станции «Радио России» (частота 6160 кГц) с периодами от 1 минуты до 60 суток

Особенности спектрального состава в диапазоне периодов от 5 до 120 минут обсуждаются в разделе 4.3. Обнаружены сезонные особенности вариаций с такими периодами, являющиеся проявлением внутренних гравитационных волн. Интенсивность вариаций минимальна для весеннего сезона. Спектральная плотность мощности (СПМ) для весеннего и зимнего сезонов различается в 3-4 раза. Периоды вариаций с максимальной интенсивностью составляют 6-12 минут для зимнего и 20-40 минут для осеннего сезонов.

В разделе 4.4 проанализированы особенности спектров вариаций с периодами несколько часов. Максимум вариаций для всех сезонов соответствует периоду 24 часа, что является проявлением регулярных изменений ионосферных параметров. Обнаружены сезонные особенности этой закономерности. Сравнение для различных месяцев показало, что наибольшую амплитуду имеют вариации для осеннего и зимнего сезонов.

В разделе 4.5 представлены результаты анализа вариаций с периодами несколько суток. Были вычислены спектры вариаций с периодами от 2 до 60 дней и проанализированы периоды для максимумов интенсивности вариаций. На рис.3 представлены спектры, полученные методом MUSIC. Для этого примера был использован временной ряд среднесуточных значений ДСЧ, полученных в ходе измерений с декабря по март 2006г. Максимальные значения СПМ соответствуют периодам 2, 4, 7, 8, 15 суток. При анализе всех полученных данных наиболее устойчиво выделяется период равный двум суткам.

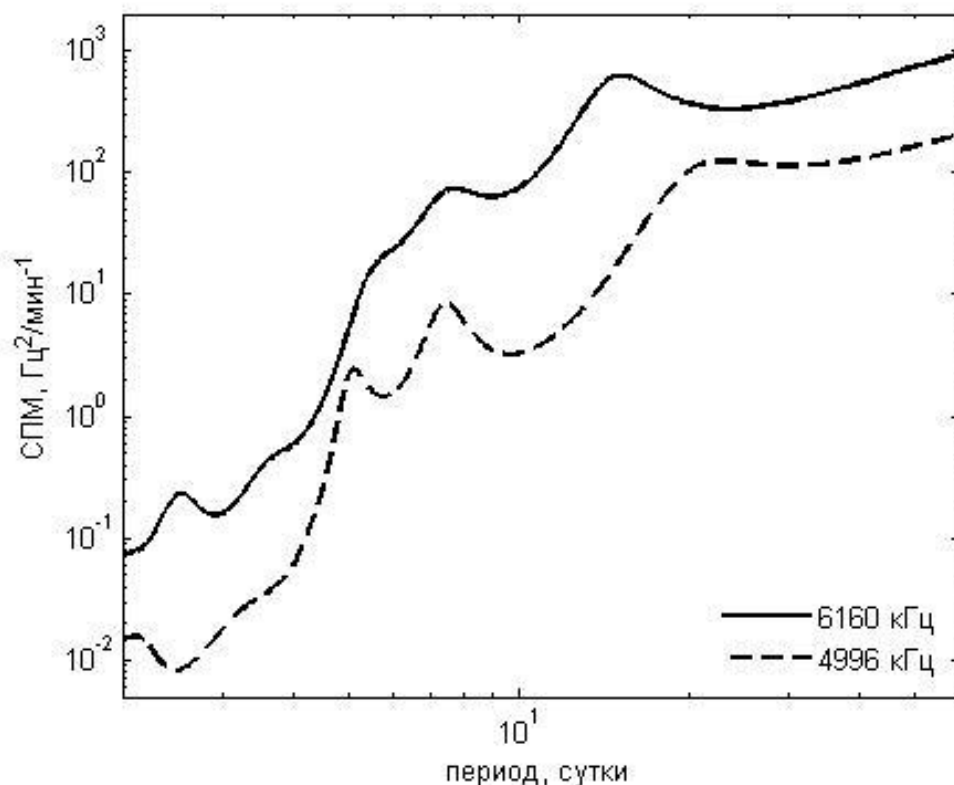


Рис.3. Спектры вариаций ДСЧ с периодами от 2 до 60 суток.

Пятая глава посвящена анализу особенностей ионосферных возмущений во время геомагнитных бурь, влияющих на изменения ДСЧ.

В разделе 5.1 проведен сравнительный анализ особенностей вариаций ДСЧ для дней с разным уровнем геомагнитной активности в диапазонах периодов, соответствующих средне и крупномасштабным ионосферным возмущениям, а также периодам геомагнитных пульсаций. Установлено, что размах вариаций ДСЧ увеличивается для всех рассмотренных диапазонов периодов, т.е. во время геомагнитных возмущений увеличивается интенсивность ионосферных возмущений, являющихся проявлением внутренних гравитационных волн и пульсаций геомагнитного поля.

В разделе 5.2 представлены результаты, полученные во время экстремально сильной геомагнитной бури 29-30 октября 2003г. В это период наблюдались интенсивные вариации ДСЧ, размах которых на порядок превосходил значения для дней без магнитных возмущений. Были зафиксированы изменения ДСЧ на 20 Гц в течении 5 минут. По форме эти вариации имеют резкий фронт, похожий по виду на фронт ударной волны.

В разделе 5.3 рассмотрены спектральные особенности для дней с повышенным уровнем геомагнитной активности. Для дней с высоким уровнем геомагнитной активности проанализированы спектральные особенности вариаций с периодами перемещающихся ионосферных возмущений среднего масштаба. Обнаружено, что интенсивность вариаций для таких дней повышена по отношению к интенсивности для спокойных дней. Показатель, определяющий наклон спектра, больше для периодов от 16 до 32 минут. Это свидетельствует о присутствии дополнительного источника возмущений в этом диапазоне периодов, связанного с геомагнитными возмущениями.

В **заключении** приведены основные результаты исследования.

1. Для интерпретации результатов доплеровского радиозондирования разработана статистическая модель влияния изменений электронной концентрации в ионосфере на ДСЧ КВ-сигнала. Установлено, что наибольший вклад в формирование ДСЧ вносит изменение электронной концентрации в интервале 20-40 км вблизи области отражения. Для используемых в рассматриваемом эксперименте частот это высотный диапазон 120 – 170 км.

Определяемая в эксперименте величина суточного размаха вариаций ДСЧ составила десятые доли Гц без учета возмущений в восходно – заходные часы. По порядку величины эти результаты соответствуют модельным расчетным значениям, полученным в предположении, что сигнал распространялся через слой F.

Максимальное влияние на ДСЧ оказывает изменение электронного содержания по времени. Наблюдается влияние горизонтальных градиентов. Вклад поперечной (поперек трассы) составляющей градиента электронного содержания в формирование ДСЧ больше, чем продольной (вдоль трассы) для обеих проанализированных трасс, как зонально-ориентированной, так и меридиональной.

2. Установлено, что в условиях низкой геомагнитной активности наибольшие значения ДСЧ наблюдаются в восходно – заходные часы и составляют 1 -2 Гц. Соответствующие значения вертикальной составляющей скорости движения области отражения достигают 60 м/с. В дневные часы значения ДСЧ не превышают десятые доли Гц, а вертикальной составляющей – десятые доли м/с.

Ионосферные процессы подобные восходно – заходным наблюдаются в момент солнечного затмения. Во время солнечного затмения 29.03.06 наблюдалось резкое изменение ДСЧ сначала до -1 Гц и затем увеличение до 2 Гц в течении 1.5 часа. Значение вертикальной составляющей скорости перемещения области отражения увеличилось до 200 м/с и затем уменьшилось до -100 м/с, т.е. изменилось на 300м/с за полтора часа.

3. Интенсивность вариаций ДСЧ, усредненная за сезон, в зимний период выше, чем в летний. Интерквартильный размах вариаций ДСЧ в летний и зимний периоды различаются в 3-4 раза. Периоды вариаций с максимальной интенсивностью составляют 6–12 минут для зимнего и 20–40 минут для осеннего сезона.

Максимум СПМ вариаций ДСЧ с периодами от 1 до 72 часов для всех сезонов соответствует периоду 24 часа. Амплитуда 24-часовой гармоник в осенний и зимний сезоны больше, чем летом.

Для вариаций ДСЧ в диапазоне от 2 до 60 дней обнаружены максимумы с периодами от 2 до 15 суток (2, 4, 5, 7, 8, 15 суток). Наиболее устойчиво выделяется максимум СПМ с периодом 2 суток.

4. Сравнительный анализ рядов ДСЧ для дней с высоким и низким уровнем геомагнитной активности показал, что размах вариаций ДСЧ во время геомагнитных возмущений увеличивается в 2-3 раза по сравнению со средними за сезон. Во время экстремально сильной геомагнитной бури 29-30 октября 2003 г. размах вариаций ДСЧ достигал 20 Гц на интервале около 10 минут.

Во время геомагнитной бури 17-18 августа 2003г. изменения вариаций ДСЧ проанализированы для диапазонов периодов 40-80 минут, 10-40 минут, 40-80 секунд. Для всех рассмотренных диапазонов периодов размах вариаций ДСЧ во время геомагнитных возмущений увеличивается, что свидетельствует об увеличении интенсивности ионосферных возмущений, являющихся проявлением внутренних гравитационных волн и пульсаций геомагнитного поля.

Во время геомагнитных возмущений СПМ вариаций ДСЧ больше для всего диапазона периодов, соответствующих воздействию внутренних гравитационных волн. Коэффициент, определяющий скорость изменения СПМ в зависимости от частоты, больше для периодов от 16 до 32 минут, что свидетельствует о присутствии дополнительного возмущения в этом диапазоне периодов.

Основные публикации автора по теме диссертационной работы

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Петрова, И.Р. Экспериментальное исследование нестационарности сигнала наклонного зондирования ионосферы на среднеширотной коротковолновой радиотрассе / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2004. - Т.XLVII, №8. - С.619-629.
2. Петрова, И.Р. Эффекты магнитной бури 29 – 31 октября 2003 г. на среднеширотной КВ – радиотрассе (по данным доплеровских измерений) / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Космические исследования. – 2004. - Т.42, № 6. - С.640-644.
3. Petrova, I.R. Application of HF Doppler measurements for the investigation of internal atmospheric waves in the ionosphere / I.R. Petrova, V.V. Bochkarev, R.R. Latipov // Adv. Space Res. – 2009. – V.44. – P.685-692.
4. Petrova, I.R. The daily variations of Doppler frequency shift of ionospheric signal on middle-latitude radio lines / I.R. Petrova, V.V. Bochkarev, V.Yu. Teplov, O.N. Sherstyukov // Adv. Space Res. – 2007. – V.40 (6). – P.825-834.

Публикации в других изданиях

5. Petrova, I.R. Research of wave processes in thermosphere by oblique sounding method / V.V. Bochkarev, R.R. Latypov, I.R. Petrova, V.Yu. Teplov // Proc. SPIE. - 2004. - V.5743. - P. 562-569.
6. Petrova, I.R. Influence of a solar eclipse on Doppler frequency shift of signal from upper atmosphere / V.V. Bochkarev, R.R. Latipov, I.R. Petrova, V.Yu. Teplov // Proc. SPIE. – V.6522. - Art. no. 652224
7. Петрова, И.Р., Особенности вариаций доплеровского смещения частоты ионосферного сигнала при различном уровне геомагнитной активности / И.Р. Петрова, В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, В.Ю. Теплов // Известия ВУЗов "Физика". - 2006. - №3. Приложение. - С.242-243.
8. Петрова, И.Р. Фазо-угломерные исследования параметров сигналов в КВ-диапазоне / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, А.А. Сонгатова, В.Ю.Теплов, В.О. Шорников //Труды XII Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн. - Москва, 2001. - Т.2. - С. 329-331.
9. Петрова, И.Р. База данных геофизической информационной системы Казанского университета/ Е.В. Биряльцев, Р.Р. Миронов, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Физические проблемы экологии: докл. 4 Всерос. Конференции. - Москва, 2004. - С.161-162.
10. Петрова, И.Р. Применение современных информационных технологий при создании автоматизированной системы мониторинга ионосферы в КВ-диапазоне /В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, А. А. Сонгатова, В. Ю. Теплов // LVII Научная сессия посвященная дню радио: труды конф. – Москва, 2002. – Т.1. - С.247-250.
11. Петрова, И.Р. Создание информационной системы и базы данных ионосферных исследований Казанского государственного университета / В. В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф. - Таганрог, 2005. – С. 423-424.
12. Petrova, I.R. Geophysical information system of the Kazan university / R.R. Latipov, E.V. Birialtcev, V.V. Bochkarev, I.R. Petrova, V. Yu. Teplov // Joint International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics/ - Tomsk, 2004. – P.64-65

13. Петрова, И.Р. Исследование волновых процессов в термосфере методом наклонного зондирования [Электронный ресурс] / В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов, О. Н. Шерстюков // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2004. - №7.- С.64-75. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/007.pdf>.
14. Petrova, I.R. Research of wave processes in lower thermosphere with use of measurements on middle-latitude radio lines of various orientations / V.V. Bochkarev, I.R. Petrova, V.Yu. Teplov // Problems of geocosmos: Proceedings of the 5 th International Conference. - St. Petersburg, 2004 - P.343 – 346.
15. Петрова, И.Р. Исследования волновых процессов в ионосфере по результатам мониторинга 2005-2006 гг. на доплеровском фазо-угломерном комплексе «Спектр» КГУ / В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И. Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике. Труды конференции. – Иркутск, 2006. - С.88-93.
16. Петрова, И.Р. Особенности волновых процессов в верхней атмосфере Земли во время магнитных возмущений, вызванных солнечной вспышкой / В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике. Труды конференции. - Иркутск, 2004. - С. 194-196.
17. Петрова, И.Р. Влияние геомагнитной активности на вариации доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала / В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Излучение и рассеяние ЭМВ: труды междунар. конф. – Таганрог, 2005 - С. 425-427.
18. Petrova, I.R. Distribution of amplitude and phase fluctuations in the tilt ionospheric sounding signals / I.R. Petrova, V.V. Bochkarev, V.Yu. Teplov // Microwave and telecommunication technology: Proceedings of the 14th international conf. – Sevastopol, 2004. – P.773-774.
19. Петрова, И.Р. Влияние интервала стационарности ионосферного радиосигнала на угломерные измерения в системе с малой базой / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Труды XX всероссийской конференции по РРВ. - Н.Новгород, 2002. – С. 296-297
20. Петрова, И.Р. Анализ нестационарности сигнала наклонного зондирования ионосферы / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ». - Таганрог, 2003. - С. 256-258
21. Petrova, I.R.. Use of GPS network data for HF Doppler measurements interpretation. [Электронный ресурс] / I.R. Petrova, V.V. Bochkarev, R.R. Latipov // Beacon Satellite Symposium. Abstract. - Barcelona, 2010. - доступа: <http://congress.cimne.com/bss2010/Admin/Files/FileAbstract/a102.pdf>
22. Петрова, И.Р. Анализ периодических возмущений в нижней термосфере по вариациям параметров сигнала наклонного зондирования / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ». - Таганрог, 2003. - С. 252-255
23. Petrova, I.R. Study of Doppler frequency shift and spectral broadening of ionospheric HF-signals / I.R.Petrova, V.V. Bochkarev // Geophysical Research. EGU General Assembly. Abstracts. - V. 10. – P. EGU2008-A-06918.
24. Petrova, I.R. Influence of solar eclipse on ionospheric signal Doppler frequency shift / V.V. Bochkarev, R.R. Latipov, I.R. Petrova, V.Yu. Teplov // XIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Abstracts. - Tomsk, 2006. - P.175.
25. Петрова, И.Р. Обнаружение ВГВ в нижней термосфере по вариациям углов прихода и доплеровских сдвигов частоты сигнала наклонного зондирования / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Труды XX всероссийской конференции по РРВ. - Н.Новгород, 2002. – С. 295.
26. Петрова, И.Р. Обнаружение внутренних гравитационных волн в нижней термосфере по данным наклонного зондирования / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Материалы конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». – Москва, 2002. - С.64-66

27. Петрова, И.Р. Параметры волновых движений в нижней ионосфере по наблюдениям на доплеровском фазо-угломерном комплексе Казанского гос. Университета / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике. Труды конференции. - Иркутск, 2003. - С.52-54
28. Petrova, I.R. The analysis of wave disturbance effects in low thermosphere on doppler measurement data / R.R. Latipov, V.V. Bochkarev, I.R. Petrova, V.Yu. Teplov // Joint International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. - Tomsk, 2004. – P.180
29. Петрова, И.Р. Анализ эффектов волновых движений в нижней термосфере по данным доплеровских измерений / В.В. Бочкарев, И.Р. Петрова, В.Ю. Теплов // 4 Всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии». Тезисы докладов. - Москва, 2004. - С.172-173
30. Петрова, И.Р. Сезонные особенности спектрального состава вариаций доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала / И.Р. Петрова, В.В. Бочкарев, Р.Р. Латыпов // Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭМВ». - Таганрог, 2007. - С.116-121.
31. Петрова, И.Р. Исследование спектральных особенностей ионосферных волновых возмущений различных масштабов по данным доплеровского радиозондирования / И.Р. Петрова, В.В. Бочкарев // Труды Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн РРВ-22». - Ростов-на-Дону, п. Лoo, 2008. - С.133-136.
32. Petrova, I.R. Research of wave processes in ionosphere on the basis of Doppler experimental data / I.R. Petrova, V.V. Bochkarev, R.R. Latipov // IRI/COST 296 Workshop. Abstracts. - Prague, 2007. - С.65

Список использованной литературы

- 1 Афраимович, Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Э. Л. Афраимович - М.: Наука, 1982. - 198 с.
- 2 Нагорский, П.М. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение коротких радиоволн / Ю.Е Таращук., П.М. Нагорский, Б.Б. Борисов, Н.Е. Егоров, В.В. Жебсаин, В.Ф. Киселев, Е.И. Петрушин, Н.И. Тимченко, Б.Б. Цыбилов - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986.- 164 с.
- 3 Бочкарев, Г.С. Взаимодействие декаметровых радиоволн на частотах вблизи МПЧ F2 при наклонном распространении. / Г.С. Бочкарев, В.Ю. Ким, Л.А. Лобачевский., Б.Е. Лянной, В.В. Мигулин, О.С. Сергеевко, Ю.Н. Черкашин //Геомagnetизм и аэрономия. – 1979. - Т.19. - С.830-833.
- 4 Вертоградов, Г.Г. Комплексное экспериментальное оценивание характеристик распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах различной протяженности и ориентации / Г.Г.Вертоградов, Ю.П.Мятежников, В.П.Урядов, С.В.Розанов //Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2004. - Т.XLVII, № 1. - С.15-31.
- 5 Бурмака, В.П. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором / В.П. Бурмака, Л.С. Костров, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. - 2003. - Т.8, № 2. - С. 143–162.
- 6 Нагорский, П.М. Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами / П.М. Нагорский // Изв. ВУЗов Радиофизика. –1999. - Т.XLII, № 1. - С. 36-44.
- 7 Благовещенская, Н.Ф. Исследование глобальных магнитно-ионосферных возмущений доплеровским методом / Н.Ф. Благовещенская, В.А. Бубнов, Г.В. Могильников // Труды Арктического и Антарктического института. Геофизические исследования в высоких широтах. – 1991. – Т.425. – С.152-159.
- 8 Теплов, В.Ю. Развитие интерференционных методов зондирования ионосферы: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 /Теплов Вадим Юрьевич. – Казань, 2005 –24 с.